

I.1 Introduction

L'évolution des technologies conduit à utiliser des machines nécessitant des vitesses de rotation précises et variables pour l'entraînement d'engins industriels, systèmes robotiques...etc. Dans notre étude, on s'intéresse aux moteurs à courant continu, car ils offrent une introduction facile au fonctionnement de ses homologues, en donnant des repères clairs. Les moteurs à courant continu ont pendant longtemps été les seuls aptes à la vitesse variable ayant une large bande passante, comme dans le domaine robotique. Ils ont donc fait l'objet de nombreuses améliorations, et beaucoup de produits commercialisés aujourd'hui.

Une machine à courant continu est une machine électrique. Il s'agit d'un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique. Elle est aussi appelée dynamo.

- En fonctionnement moteur, l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique,
- En fonctionnement générateur, l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique. La machine se comporte comme un frein.

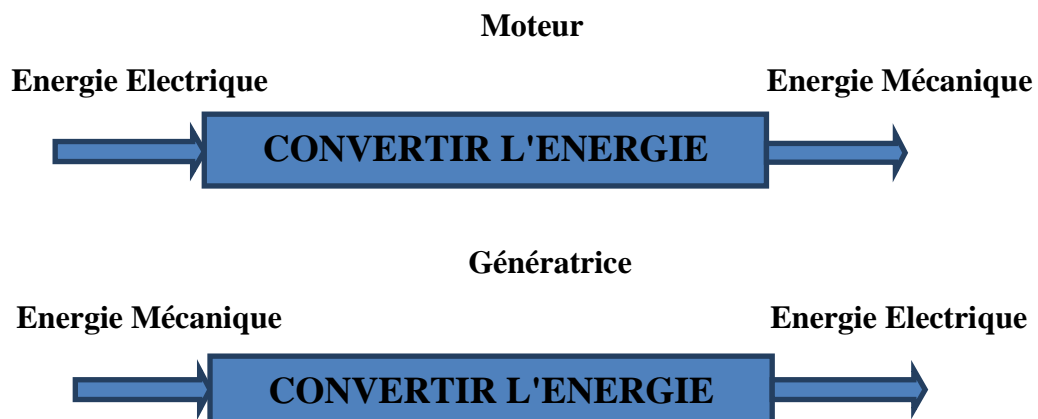


Figure (I.1): Fonctionnement de la machine à courant continu.

I.2 Organisation de la machine

Dans l'organisation d'une machine à courant continu, on peut distinguer les principaux éléments suivants:

I.2.1 Pôles inducteurs

Les pôles inducteurs ont pour rôle de créer le flux inducteur dans la machine "entre la culasse et l'induit".

- Ce flux est généré soit par des enroulements, soit par des aimants,
- Ce flux est canalisé dans la machine par des matériaux ferromagnétiques "parties hachurées",
- Ce flux étant constant dans la partie portant les pôles inducteurs et dans les pôles inducteurs eux-mêmes.

I.2.2 Stator "inducteur"

Le stator, partie fixe, constitué par un aimant ou un électroaimant appelé également inducteur qui crée un champ magnétique dirigé vers l'axe du rotor. Il est formé d'aimants (Figure (1.1-a)) pour les petits moteurs et des bobines (Figure (1.1-b)) parcourue par un courant continu. Les aimants ou bobines permettent la création d'un flux magnétique.

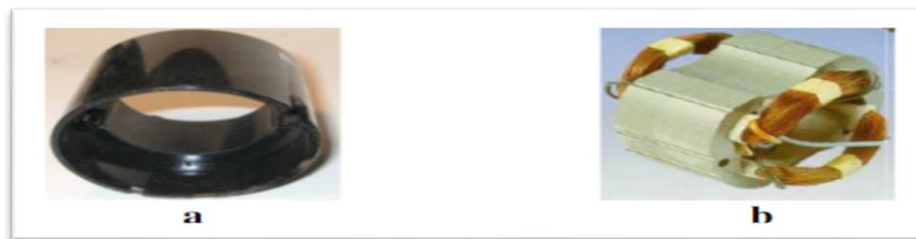


Figure (I.2) : a- Aimant b- Bobines.

I.2.3 Induit "Rotor"

Le rotor, partie mobile, appelé également induit, constitué par un cylindre d'acier doux à la périphérie duquel sont disposés des conducteurs reliés aux lames du collecteur sur lesquelles frottent deux charbons, ou balais, qui assurent la liaison avec les bornes du moteur.



Figure (1.3): Induit.

I.2.4 Collecteur

Il est formé d'un ensemble de lames de cuivre isolées latéralement les unes des autres et disposées suivant un cylindre en bout du rotor. Deux balais portés par le stator frottent sur les lames du collecteur. [1]

I.3 Organes mécaniques

Le stator autoporteur reçoit de chaque côté un flasque sur lequel le rotor sera positionné grâce à des roulements à billes ou à rouleaux suivant le type de charge "axiale ou radial". Les pôles inducteurs sont en général vissés sur le stator. "Ils peuvent aussi en faire partie intégrante".

Un ventilateur est placé en bout d'arbre, sur le rotor, pour le refroidissement de la machine. Il peut être complété par une ventilation forcée motorisée pour le refroidissement aux vitesses lentes. Le collecteur, l'ensemble porte-balais et les balais se situent de l'autre côté de la machine.

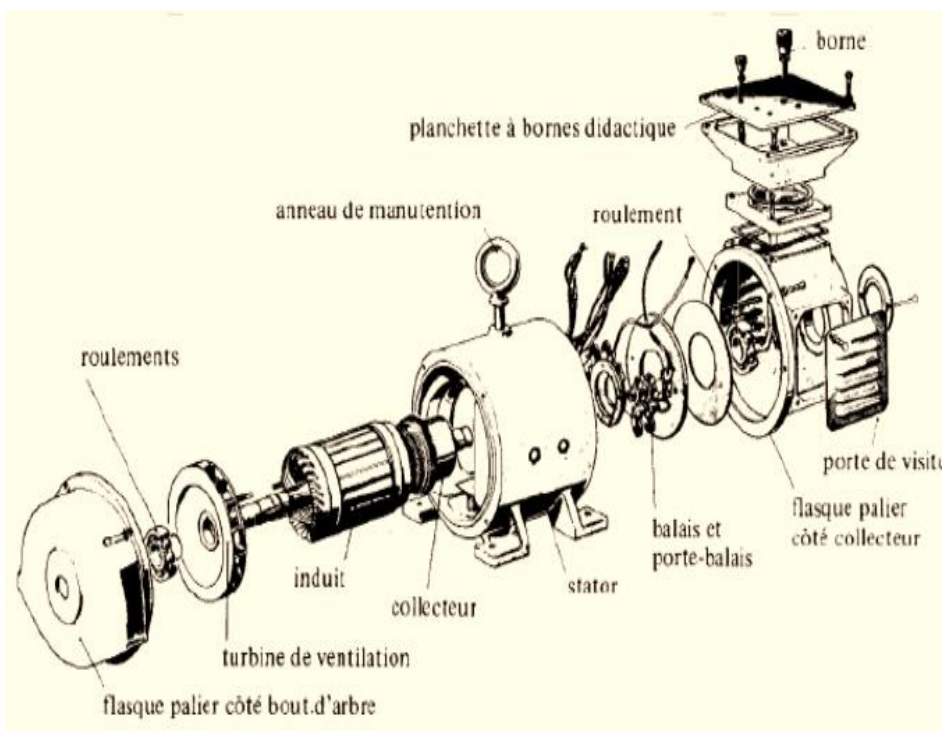


Figure (I.4): Constitution de la MCC "Machine à Courant Continu".

I.4 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du moteur à courant continu est basé sur le principe des forces de Laplace: Un conducteur de longueur (L), placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant, est soumis à une force électromagnétique. Le champ créé par l'inducteur agit sur les conducteurs de l'induit: Chacun des (N) conducteurs de longueurs (L) placé dans le champ (B) et parcouru par un courant (I) est le siège d'une force électromagnétique perpendiculaire au conducteur :

$$F = B.S.L.\sin \alpha \quad (I.1)$$

Ces forces de Laplace exercent un couple proportionnel à l'intensité (I) et au flux (Φ) sur le rotor. Le moteur se met à tourner à une vitesse proportionnelle à la tension d'alimentation (V) et, inversement proportionnelle au flux (Φ).

Au passage de tout conducteur de l'induit sur la ligne neutre, le courant qui le traverse change de sens grâce au collecteur. Le moteur conserve le même sens de rotation. Pour inverser le sens de rotation du moteur, il convient d'inverser le sens du champ produit par l'inducteur par rapport au sens du courant circulant dans l'induit:

- soit on inverse la polarité de la tension d'alimentation de l'induit.
- soit on inverse la polarité d'alimentation du circuit d'excitation. [4]

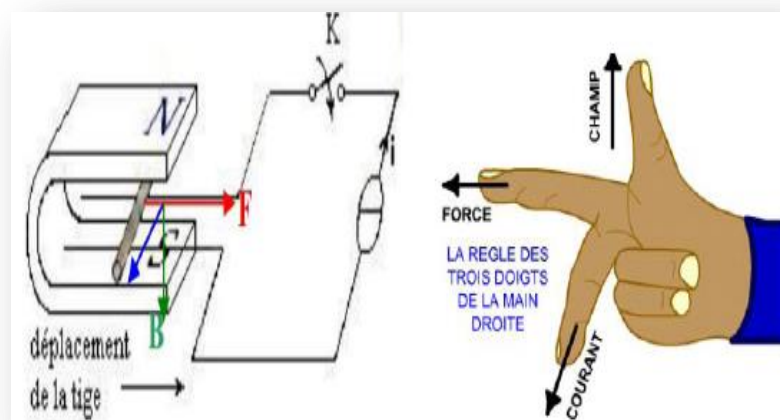


Figure (I.5) : Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu.

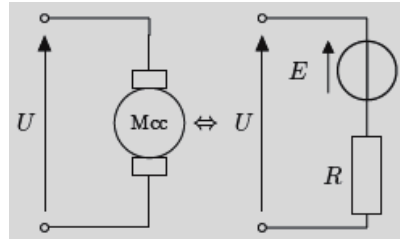
I.5 Modélisation de moteur à courant continu

I.5.1 Mise en équation des phénomènes physiques

Le moteur à courant continu peut être modélisé de deux manières, selon le régime.

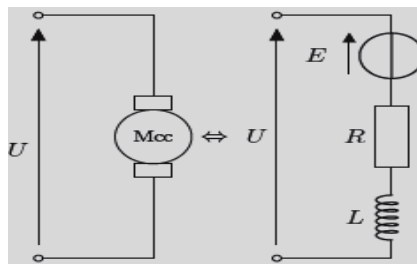
Comportement en régime établi

- **Définition** : On considère le régime comme établi s'il n'y a pas de variation de vitesse ou de tension.
- **Modèle** : Le moteur est constitué d'une résistance R créée par les spires bobinées du rotor ($R = \frac{\rho L}{S}$), en série avec une force électromotrice E provoquée par une variation de flux sur le bobinage induit (Loi de Lenz : $E(t) = -\frac{d\phi(t)}{dt}$).



Comportement en régime dynamique (ou transitoire)

- **Définition** : On considère le régime comme dynamique s'il n'est pas établi.
- **Modèle** : Le modèle est presque similaire au régime établi, à cela près qu'on ajoute en série une inductance L l'issue du bobinage induit.



❖ Équations électriques et mécaniques

Par loi des mailles sur le modèle précédent, il vient :

- Comportement en régime établi:

$$U(t) = E(t) + RI(t) \quad (\text{I.2})$$

- Comportement en régime dynamique (ou transitoire):

$$U(t) = E(t) + RI(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{I.3})$$

I.5.2 Force électromotrice

La force électromotrice $E(t)$ est une tension induite par la variation de champ magnétique reçu par les bobinages (voir cours d'électromagnétisme en physique).

On retiendra que cette variation est proportionnelle à la vitesse de rotation (Ω) et :

$$E(t) = K\Omega(t) \quad (\text{I.4})$$

Où K est la constante électromagnétique (en V s/rad) caractéristique du moteur, donnée par le constructeur.

I.5.3 Force contre électromotrice

Elle est donnée par la relation d'électrotechnique. La force électromotrice (E) est la tension produite par le rotor (l'induit) lors de sa rotation dans le flux magnétique produit par la partie fixe (l'inducteur). Elle dépend des éléments de construction de la machine. [5]

$$E = \frac{P}{a} N \cdot n \cdot \phi \quad (\text{I.5})$$

P: nombre de pair de pôles de la machine.

N: nombre de conducteurs actifs de la périphérie de l'induit.

a : nombre de paires de voies de l'enroulement entre les deux balais.

n : fréquence de rotation de l'induit (en t/s).

ϕ : Flux sous un pôle de la machine en Webers (Wb).

Finalement :

$$E = K \cdot \Omega \cdot \phi \quad (\text{I.6})$$

$$K = \frac{P}{2\pi a} N \quad (\text{I.7})$$

I.5.4 Couple

Le couple $C(t)$ exercé par le stator sur le rotor est proportionnel au courant $I(t)$ qui alimente le moteur:

$$C(t) = KI(t) \quad (\text{I.8})$$

En l'absence de perte, le K présenté ci-dessus est le même que pour la force électromotrice.

I.5.5 Puissance mécanique et électrique

En l'absence de perte, il vient:

$$\text{Puissance mécanique: } P_{em}(t) = C(t)\Omega(t) \quad (\text{I.9})$$

$$\text{Puissance électrique: } P_{em}(t) = E(t)I(t) = U(t)I(t) - RI^2(t). \quad (\text{I.10})$$

I.5.6 Principe fondamental de la dynamique

Si on isole le rotor, le principe fondamental de la dynamique en rotation autour de l'arbre du moteur donne:

$$\text{- En l'absence de frottement: } C(t) = J \frac{d\Omega(t)}{dt} \quad (\text{I.11})$$

$$\text{Avec frottement fluides: } fC(t) - f\Omega(t) = J \frac{d\Omega(t)}{dt} \quad (\text{I.12})$$

$$\text{Avec frottement fluides et couple résistant: } C_{(t)} - C_r(t) - f\Omega(t) = J \frac{d\Omega(t)}{dt} \quad (\text{I.13})$$

Où J est le moment d'inertie du rotor.

J représente l'inertie en rotation, c'est à dire la difficulté à modifier la vitesse de rotation.

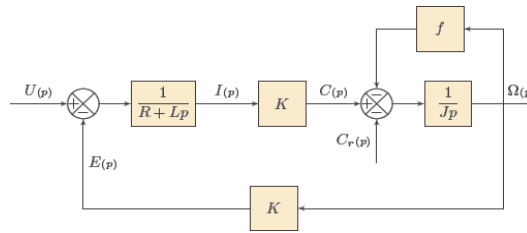
❖ Comportement global

Le comportement global d'un moteur à courant continu peut s'exprimer sous la forme d'un schéma bloc via les transformées de Laplace ² :

$$\begin{aligned}
 U_{(t)} &= E_{(t)} + RI_{(t)} + L \frac{dI_{(t)}}{dt} & U_{(p)} &= E_{(p)} + (R + pL)I_{(p)} \\
 E_{(t)} &= K\Omega_{(t)} & E_{(p)} &= K\Omega_{(p)} \\
 C_{(t)} &= KI_{(t)} & C_{(p)} &= KI_{(p)} \\
 -C_r(t) - f\Omega_{(t)} &= J \frac{d\Omega_{(t)}}{dt} & C_{(p)} - C_r(p) - f\Omega_{(p)} &= J_{(p)}\Omega_{(p)} \quad (I.14)
 \end{aligned}$$



Ces équations nous amènent au schéma bloc suivant:



Après calcul, la fonction de transfert d'un moteur à courant continu (sans couple résistant) est:

$$H_M(p) = \frac{K}{(jp+f)(R+Lp)+K^2} = \frac{\frac{K}{fR+K^2}}{\frac{JL}{fR+K^2}p^2 + \frac{fL+JR}{fR+K^2}p+1} \quad (I.14)$$

$$H_M(p) = \frac{K_0}{\mathcal{T}\mathcal{T}_e p^2 + (\mathcal{T} + \alpha\mathcal{T}_e)p + 1} \quad (I.15)$$

Avec:

$$\mathcal{T} = \frac{RJ}{K^2+Rf} \quad \mathcal{T}_e = \frac{L}{R} \quad K_0 = \frac{K}{K^2+Rf} \quad \alpha = \frac{Rf}{K^2+Rf} \quad (I.16)$$

- \mathcal{T} est appelé constante de temps électromécanique (d'autant plus grande que l'inertie J est grande),
- \mathcal{T} est appelé constante de temps électrique (issue des composants électroniques, notamment l'inductance).

En général, la partie électromécanique réagit moins vite que la partie électrique et on montre que: $\mathcal{T} \ll \mathcal{T}_e$

Après quelques simplifications sur les ordres de grandeurs (non présentées), le moteur peut être considéré comme produit de deux fonctions du premier ordre :

- une fonction liée à la mécanique (de constante de temps \mathcal{T}).
- une fonction liée à l'électronique (de constante de temps \mathcal{T}_e). [5] [6]

$$H_m(p) \approx \frac{K_0}{(1+\mathcal{T}p)(1+\mathcal{T}_e p)} \quad (I.17)$$

I.6 Les différents types de moteurs

On distingue deux types de moteurs à courant continu :

I.6.1 Les moteurs à inducteur à aimant permanent

Il n'y a pas de circuit inducteur, le flux inducteur est produit par un aimant permanent. Tous les moteurs à courant continu de faible puissance et les micromoteurs sont des moteurs à aimant permanent. Ils représentent maintenant la majorité des moteurs à courant continu. Ils sont très simples à utiliser.

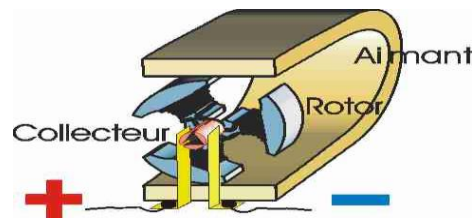


Figure (I.6) : Moteur à aimant permanent.

I.6.2 Les moteurs à inducteur bobiné

Il existe quatre types différents de moteurs électriques qui sont classés en fonction du type d'excitation qui est employé, qui sont :

- le moteur à excitation séparée.
- le moteur à excitation shunt.
- le moteur à excitation série.
- le moteur à excitation composée.

I.6.2.1 Le moteur à excitation séparée

Dans un moteur à excitation séparée ou indépendante, le circuit d'excitation est séparé du circuit d'induit. Si l'inducteur est un aimant permanent, le flux (Φ) est constant. Si l'inducteur est un électroaimant alimenté par une source de tension continue réglable, le flux (Φ) ne dépend que du courant dans l'inducteur appelé courant d'excitation (I_e).

Le courant crée un champ et une quantité de champ à travers une spire donne un flux. Si la tension (V_e) est constante, le courant d'excitation (I_e) est constant et le flux (Φ) est constant.

Dans ces conditions, la force contre électromotrice (E) ne dépend que de la fréquence (n) de rotation. Donc la fréquence de rotation (n) est proportionnelle à la tension (V) d'alimentation du moteur. Compte tenu de la conservation de la puissance d'une machine (en négligeant les pertes), la puissance électrique absorbée est :

$$P_a = V \cdot I \quad (I.5)$$

La puissance mécanique fournie est :

$$P_u = T_u \cdot \Omega = T_u \cdot 2\pi \cdot n \quad (\text{I.6})$$

Si (V) est proportionnelle à (n) cela signifie que (T_u) est proportionnel à (I). Donc le couple utile (T_u) est proportionnel à l'intensité du courant d'alimentation du moteur. Pour un moteur à excitation séparée, le flux (Φ) est constant donc la fréquence de rotation (n) est proportionnelle à la tension d'alimentation (V) :

$$n = \frac{E}{K\phi} = \frac{V - R \cdot I}{K\phi} = K \cdot V \quad (\text{I.7})$$

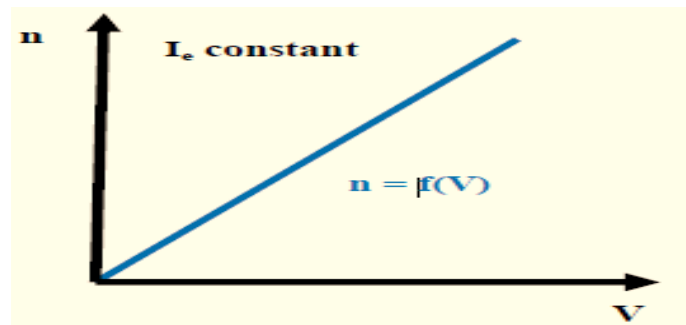


Figure (I.7): Caractéristiques d'un moteur à excitation séparée.

Notons que le couple (T_u) est proportionnel à l'intensité du courant d'alimentation (I) :

$$T = \frac{E \cdot I}{\Omega} = K \cdot \phi \cdot I = K' \cdot I \quad (\text{I.8})$$

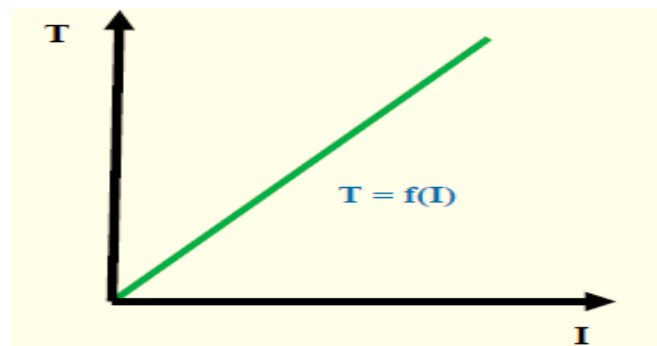


Figure (I.8) : Le couple en fonction de courant d'alimentation.

I.6.2.2 Le moteur à excitation série

Dans un moteur à excitation série ou moteur série, le circuit d'excitation est en série avec le circuit d'induit. Le flux n'est plus constant mais proportionnelle à (I).

Dans ces conditions, la force contre électromotrice (E) dépend de la fréquence (n) de rotation et de l'intensité du courant (I). Donc la fréquence de rotation (n) est proportionnelle à la tension (V) et au courant (I) d'alimentation du moteur. Compte tenu de la conservation de la puissance d'une machine (en négligeant les pertes), la puissance électrique absorbée est :

$$P_a = V \cdot I \quad (\text{I.9})$$

$$P_u = T_u \cdot \Omega = T_u \cdot 2\pi \cdot n \quad (\text{I.10})$$

Si (n) est proportionnelle à (V) et à (I) cela signifie que (T_u) est proportionnel au carré de l'intensité (I^2). Donc le couple (T_u) est proportionnel au carré de l'intensité du courant d'alimentation du moteur. [3]

Pour un moteur à excitation série, le flux (Φ) n'est pas constant mais proportionnel à (I) donc la tension d'alimentation (V) est proportionnelle à la fréquence de rotation n et à l'intensité (I). [4]

$$E = k. n. N. \phi = K. \Omega. I \quad (\text{I.11})$$

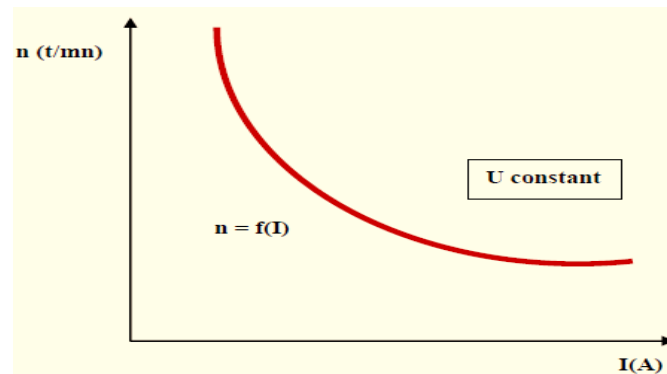


Figure (I.9) : Caractéristique de vitesse d'un moteur série.

Le couple (T) est proportionnel au carré de l'intensité du courant d'alimentation (I).

$$T = \frac{E.I}{\Omega} = K. I^2 \quad (\text{I.12})$$

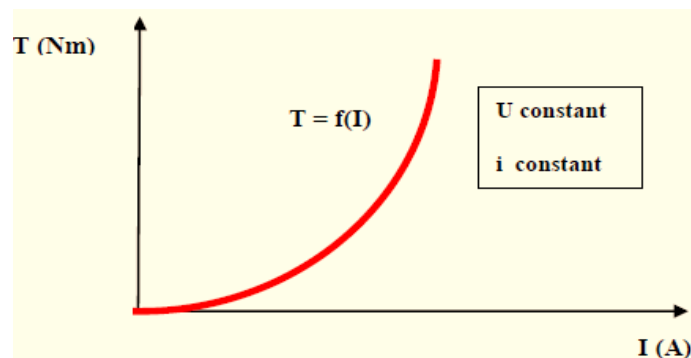


Figure (I.10) : Caractéristique de couple d'un moteur série.

I.6.2.3 Le moteur à excitation shunt

La même source d'alimentation alimente l'induit et l'inducteur. L'inducteur est mis en parallèle avec l'induit. Les propriétés du moteur à excitation dérivation sont les mêmes que celle du moteur à excitation indépendante.

I.6.2.4 Le moteur à excitation composée

Modes de branchement:

Courte dérivation : l'enroulement est shunté directement avec l'induit.

Long dérivation : l'enroulement est shunté en parallèle avec l'induit.

I.7 Variation de vitesse

Pour faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu, on peut agir sur la tension aux bornes de l'induit. La tension d'induit est directement proportionnelle à la vitesse de rotation. La puissance varie mais le couple reste constant. On dit alors que l'on fait de la variation de vitesse à couple constant.

I.8 Les avantages et les inconvénients

I.8.1 Les avantages

- Alimentation aisée dans les systèmes transportant leur réserve d'énergie (autonome) : pile ou batterie.
- La variation de fréquence de rotation est simple à réaliser.

I.8.2 Les inconvénients

Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais, ou charbons et le collecteur rotatif.

- Plus la vitesse de rotation est élevée, plus les balais doivent appuyer fort pour rester en contact et plus le frottement est important,
- Aux vitesses élevées les charbons doivent être remplacés très régulièrement,
- Le contact électrique imparfait cause des arcs électriques, usant rapidement le commutateur et générant des parasites dans le circuit d'alimentation. [04]

I.9 Bilan de la puissance

On peut représenter le bilan des puissances mises en jeu dans un moteur à courant continu en fonctionnement nominal par une flèche qui rétrécit au fur et à mesure que la puissance diminue.

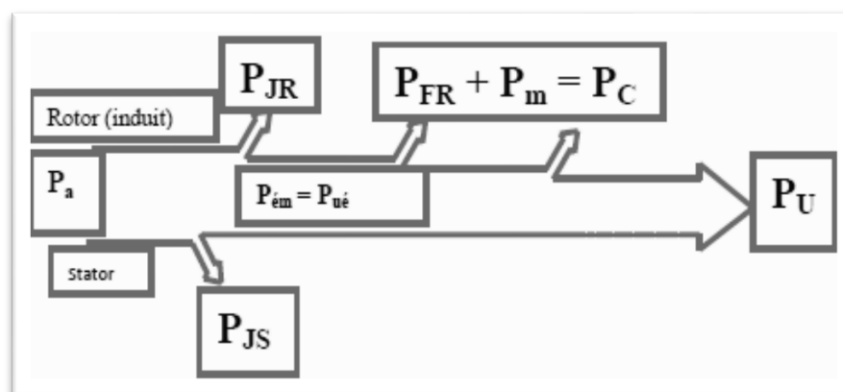


Figure (I.11) : Bilan de la puissance.

P_a : Puissance absorbée,

P_u : Puissance utile,

P_{em} : Puissance électromagnétique,

P_{JS} : Pertes par effet joule dans l'inducteur,

P_{JR} : Pertes par effet joule dans l'induit,

P_c : Pertes fer + pertes mécaniques: dites pertes constantes.

I.10 Le rendement

Les moteurs à courant continu consomment une partie de l'énergie absorbée pour leur fonctionnement. L'énergie mécanique fournie sera toujours plus petite que l'énergie électrique absorbée. Le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie absorbée est le rendement.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (\text{I.13})$$

P_u : Puissance utile.

P_a : Puissance absorbée.

I.11 Utilisation de la machine à courant continu

Le moteur série est intéressant quand la charge impose d'avoir un gros couple, au démarrage et à faible vitesse de rotation. Le moteur sépare est particulièrement adapté aux entraînements de machines nécessitant des vitesses réglables (action sur la tension) et présentant un couple important en basse vitesse (machines-outils).

- démarreur (automobile ...).
- moteur de traction (locomotive, métro ...).
- appareils de levage.
- Ventilateurs, pompes centrifuges, compresseurs, pompes à piston.
- Machines-outils à couple variable ou a mouvement alternatif (étaux limeurs, raboteuses).

I.12 Conclusion

Ce chapitre a permis de rappeler les différents éléments qui constituent une machine à courant continu et le principe de fonctionnement. Après ce rappel, nous avons constaté que les moteurs à excitation séparée et à aimant périmant sont les plus adaptés pour la variation de vitesse.